

长期水氮定位对小麦幼苗质量及产量形成的调控效应

李楠¹, 李浩然², 张鸿雁¹, 代成成¹, 刘世超¹, 杨瑞婷¹,

苗童童¹, 马子惠¹, 李远松¹, 刘秋彤¹, 李瑞奇¹, 李东晓¹

(1.河北农业大学农学院,华北作物改良与调控国家重点实验室,河北保定071001;

2.云南农业大学农学与生物技术学院,昆明650201)

摘要: [目的] 为解决黄淮海地区水肥时空分布与小麦阶段需求不匹配、产能提升受限等问题,开展了长期不同水氮定位条件下小麦产量形成特性研究,为小麦高产高效栽培提供理论依据。[方法] 以河北农业大学辛集试验站开展的长期定位试验(2015年始)为基础,共设置9个水氮耦合处理,水分处理3个,即全生育期灌0水(W0)、拔节期1水(W1)、拔节期和开花期2水(W2);氮肥处理3个,即不施氮(N0)、纯氮120 kg/hm²(N1)、纯氮240 kg/hm²(N2)。供试小麦品种“藁优2018”,数据采用2023—2025年小麦季监测结果。研究长期水氮处理对冬小麦生长生理调控及产量形成过程中小麦群体茎数、干物质积累与分配、产量及构成因素、幼苗生长指标、内源激素含量等变化,采用偏最小二乘路径模型明确调控产量形成的主要影响因素。[结果] 随着灌溉与施氮量增加,小麦产量呈上升趋势,其中以W2N2处理最高,但与W2N1处理无显著差异;W0与N0处理因水分和氮素供应不足均无法实现高产。2个生长季,产量表现为W1N2较W1N1平均提升13.75% ($p < 0.05$), W2N2较W2N1平均提升5.67%; W2N1较W1N1平均提升18.10% ($p < 0.05$), W2N2较W1N2平均提升9.47%。W2N2与W2N1处理的穗数、千粒重及开花期与成熟期总茎数均无显著差异, W2N2处理的穗粒数、成熟期干物质积累量较W2N1分别平均提升11.98% ($p < 0.05$)和5.46% ($p < 0.05$),但第2个生长季W2N1处理的成穗率较W2N2提升15.40% ($p < 0.05$),有效补偿穗粒数的不足。W2N1与W2N2处理下的SPAD无显著差异,且W2N1处理下的氮素吸收效率、氮肥生产效率较W2N2显著提升78%、90%。苗期小麦在N1处理下的株高、次生根数、根干重均显著高于N2处理,同时根系中GA₃、IAA含量分别提升27.92% ($p < 0.05$)和55.31% ($p < 0.05$),地上部ABA含量降低18.99% ($p < 0.05$),形成良好的壮苗基础。偏最小二乘路径模型表明,IAA、GA₃通过增加根干重、根长等促进养分吸收,并显著作用于叶绿素含量,提高氮积累量和氮素吸收效率,总茎数与干物质积累量呈极显著正相关(路径系数=0.996, $p < 0.001$),干物质积累量与穗数呈显著正相关(路径系数=0.648, $p < 0.01$),最终作用于产量(路径系数=0.777, $p < 0.001$)。[结论] 在长期定位试验条件下, W2N1处理仍实现小麦高产,主要由于小麦幼苗生长质量较高,表现为促生长激素含量高、根系发育较好、植株干物质积累量增加;中后期的茎穗数、成穗率、SPAD和氮素吸收效率提升,保证产量不显著降低,为生产上进一步控肥增效提供数据参考。

关键词: 小麦; 水氮; 内源激素; 产量

中图分类号: S512.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0323-16

Regulatory Effects of Long-Term Water and Nitrogen Positioning on Wheat Seedling Quality and Yield Formation

LI Nan¹, LI Haoran², ZHANG Hongyan¹, DAI Chengcheng¹, LIU Shichao¹, YANG Ruiting¹,

MIAO Tongtong¹, MA Zihui¹, LI Yuancong¹, LIU Qiutong¹, LI Ruiqi¹, LI Dongxiao¹

(1.College of Agronomy, Hebei Agricultural University, State Key Laboratory of North China Crop Improvement and

收稿日期: 2025-10-19

修回日期: 2025-11-18

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2301500)

第一作者: 李楠(2000—),女,硕士研究生,主要从事作物栽培研究。E-mail: 3242288984@qq.com

通信作者: 李东晓(1984—),女,博士,副研究员,主要从事作物抗逆生理研究。E-mail: lidongxiao.xiao@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

Regulation, Baoding, Hebei 071001, China; 2.College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] To address the mismatch between the spatiotemporal distribution of water and fertilizer and the stage-specific demands of wheat, as well as the constraints on yield potential in the Huang-Huai-Hai region, this study investigates the characteristics of wheat yield formation under the condition of long-term water and nitrogen positioning, thereby providing a theoretical basis for high-yield and high-efficiency wheat cultivation. [Methods] Based on a long-term positioning experiment (initiated in 2015) at the Xinji Experimental Station of Hebei Agricultural University, a total of 9 water-nitrogen coupling treatments were established, including three water treatments and three nitrogen treatments. The water treatments were: no irrigation throughout the entire growth period (W0), one irrigation at the jointing stage (W1), and two irrigations at the jointing and flowering stages (W2). The nitrogen treatments were: no nitrogen application (N0), pure nitrogen of 120 kg/hm² (N1), and pure nitrogen of 240 kg/hm² (N2). The wheat variety "Gaoyou 2018" was used in the experiment, and the data were obtained from the monitoring results of the wheat growing seasons from 2023 to 2025. The study investigated the effects of long-term water and nitrogen treatments on the growth and physiological regulation as well as yield formation of winter wheat, focusing on changes in population stem number, dry matter accumulation and distribution, yield and its components, seedling growth indicators, and endogenous hormone contents. A partial least squares path model (PLS-PM) was employed to identify the main factors regulating yield formation. [Results] With the increase of irrigation and nitrogen application rates, wheat yield showed an upward trend. Among all treatments, the W2N2 treatment had the highest yield, but showed no significant difference from the W2N1 treatment. The W0 and N0 treatments failed to achieve high yields due to insufficient water and nitrogen supply. During the two growing seasons, compared with W1N1, W1N2 increased the yield by an average of 13.75% ($p < 0.05$). Compared with W2N1, W2N2 increased the yield by an average of 5.67%. In terms of irrigation effects, W2N1 increased the yield by an average of 18.10% compared with W1N1 ($p < 0.05$), and W2N2 increased the yield by an average of 9.47% compared with W1N2. No significant differences were observed between the W2N2 and W2N1 treatments in spike number, 1 000-grain weight, or total stem number at the flowering and maturity stages. However, compared with W2N1, W2N2 increased the grains per spike and dry matter accumulation at the maturity stage by an average of 11.98% ($p < 0.05$) and 5.46% ($p < 0.05$), respectively. In the second growing season, the spike formation rate of W2N1 was 15.40% higher than that of W2N2 ($p < 0.05$), effectively compensating for the lower number of grains per spike. There was no significant difference in SPAD values between W2N1 and W2N2 treatments. However, nitrogen uptake efficiency and nitrogen fertilizer production efficiency under W2N1 treatment were significantly higher than those under W2N2 by 78% and 90%, respectively. At the seedling stage, plant height, number of secondary roots, and root dry weight under the N1 treatment were significantly higher than under the N2 treatment. Additionally, the contents of GA₃ and IAA in the roots increased by 27.92% ($p < 0.05$) and 55.31% ($p < 0.05$), respectively, and the ABA content in the above-ground parts decreased by 18.99% ($p < 0.05$), establishing a solid foundation for vigorous seedlings. The partial least squares path model indicated that IAA and GA₃ promoted nitrogen uptake by increasing root dry weight and root length, and significantly affected chlorophyll content, increasing nitrogen accumulation and nitrogen uptake efficiency. Total stem number showed a highly significant positive correlation with dry matter accumulation (path coefficient=0.996, $p < 0.001$). Dry matter accumulation showed a significant positive correlation with spike number (path coefficient=0.648, $p < 0.01$), ultimately affecting yield (path coefficient=0.777, $p < 0.001$). [Conclusion] Under the conditions of the long-term positioning experiment, the W2N1 treatment still achieves high wheat yield. This is mainly due to the high growth quality of wheat seedlings, which is characterized by high contents of growth-promoting hormones, good root development, and increased plant dry

matter accumulation. Additionally, the improvements in the number of tillers, spike formation rate, SPAD, and nitrogen uptake efficiency at the middle and late growth stages ensure that the yield does not decrease significantly. This study provides data support for further reducing fertilizer application and enhancing efficiency in wheat production.

Keywords: wheat; water and nitrogen; endogenous hormones; yield

Received: 2025-10-19

Revised: 2025-11-18

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-19

冬小麦是中国北方种植面积最大的口粮作物,种植面积约为2 453.33万 hm^2 ,在保障国家粮食安全层面占据关键地位^[1-2]。黄淮海地区作为中国重要的粮食主产区,小麦产量约占全国总产的76%^[3]。小麦生长生产中,氮肥影响尤其明显:适量增氮能够提升小麦产量及氮素吸收利用效率^[4-5];过量施氮既降低氮肥利用率,还会导致经济效益下降^[6]。如何在保障高产的同时,优化施肥减少氮素损失一直是研究热点、难点。此外,黄淮海地区水资源长期短缺,小麦季降水无法满足生长需求,地下水灌溉受限,粮食安全生产问题突出^[7]。因此,推行节水栽培技术,实现小麦高产稳产与资源可持续利用的协同发展,具有重要意义。

小麦幼苗阶段是其生长周期的关键起点,幼苗壮弱程度与最终产量紧密相关^[8]。壮苗小麦具备根系发达、扎根深广的特点,能高效吸收土壤中的水分与养分,为后续各生长阶段奠定坚实基础^[9-10]。高质量苗情是保障小麦稳产丰产的重要基础,培育壮苗有利于提高其冬前抗逆性^[11-12]。幼苗生长过程中,内源激素对小麦植株生长发育及抗逆起着极为关键的调控作用^[13]。其中,脱落酸(ABA)调节植株的生理生化过程,增强植株的抗旱能力^[14]。吲哚乙酸(IAA)在植物细胞分裂伸长、顶端优势及光合同化物的运输与积累等方面起着重要作用^[15]。赤霉素(GA_3)作为植物体内促进发育的激素之一,在水分缺失下合成减少,从而降低植株生长速率^[16]。相关研究^[17]表明,壮苗能够促进禾本科作物地上部和根系生长发育,增加可育分蘖数,促进产量形成。适量增氮有利于叶绿素含量增加、光合速率增强,进而提升小麦营养器官氮素积累量^[18]。但过量施氮会造成土壤氮素大量损失、显著降低氮肥利用率,且对籽粒产量和氮素积累量无显著增益^[19]。基于此,培育壮苗并维持较强生理功能,可为中后期生长发育奠定物质基础,进而保障持续生产力,最终实现高产。

栽培措施对土壤肥力的影响是一个长期过程,短期试验难以全面、准确地揭示其中规律^[20]。长期定位试验通过在同一地点持续监测固定灌水、施肥

模式下的土壤与作物响应,能弥补短期试验的局限,获得更可靠、系统的数据^[21-23]。2006—2015年的冬小麦-夏玉米水氮长期定位试验表明,从第4 a开始,施氮量在0~120 kg/hm^2 时,小麦产量随施氮量增加而增加;施氮量超过120 kg/hm^2 后,产量基本保持稳定^[24]。2015—2022年长期水氮定位试验同样表明,小麦拔节期和开花期各灌溉60 mm,全生育期施氮120 kg/hm^2 可保证小麦高产^[25]。尽管前人利用长期定位试验开展了诸多研究,但对于不同水氮耦合处理下,保证小麦高产的生长生理基础特性尚不明确。本研究基于长期水氮定位的种植背景,重点研究不同水氮处理对小麦幼苗生长质量、激素响应生理的影响并揭示其与产量间的关联机制,为冬小麦高产高效生产、制定节水减氮策略提供数据参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在河北农业大学辛集试验站($37^{\circ}47'50''\sim 37^{\circ}47'55''\text{N}$, $115^{\circ}17'58''\sim 115^{\circ}18'04''\text{E}$)进行,土壤类型为壤质潮土,该地区属典型的半干旱季风气候。2023—2025年冬小麦生育期间的气候情况见图1;两季降水量分别为157.89、128.85 mm(表1);2023—2024年年降水量在744.93~791.44 mm,属丰水年。试验田0~20 cm土壤基础地力情况见表2。

1.2 试验设计

本研究选用小麦品种“藁优2018”为材料,在2015年开展的长期定位试验点进行,数据来源于2023—2025年小麦生长季监测结果。采用二因素裂区试验设计,主区为3个灌溉量(W),分别为全生育期不灌溉(W0)、拔节期灌溉60 mm(W1)、拔节期和开花期分别灌溉60 mm(W2),水表精确控制灌溉量;副区为3个施氮量(N),分别为0 kg/hm^2 (N0)、120 kg/hm^2 (N1)、240 kg/hm^2 (N2)。共9个处理,每处理重复3次。各小区基施磷肥(重过磷酸钙,含46% P_2O_5)135 kg/hm^2 和钾肥(氯化钾,含60% K_2O)150 kg/hm^2 。50%氮肥(尿素,含N 46.4%)基施,50%氮肥在拔节期灌水前追施;W0处理的氮肥全部基施。

需注意:追肥前取样的处理标注为 N1_d 和 N2_d。前茬玉米收获后,将秸秆粉碎 2 遍还田,旋耕 3 遍;2023 年 10 月 20 日和 2024 年 10 月 14 日播种,播量为 150 kg/hm²,行距 15 cm。播种后镇压。2024 年 6 月 8 日、2025 年 6 月 2 日成熟。水肥外的生产管理均按常规麦田进行。

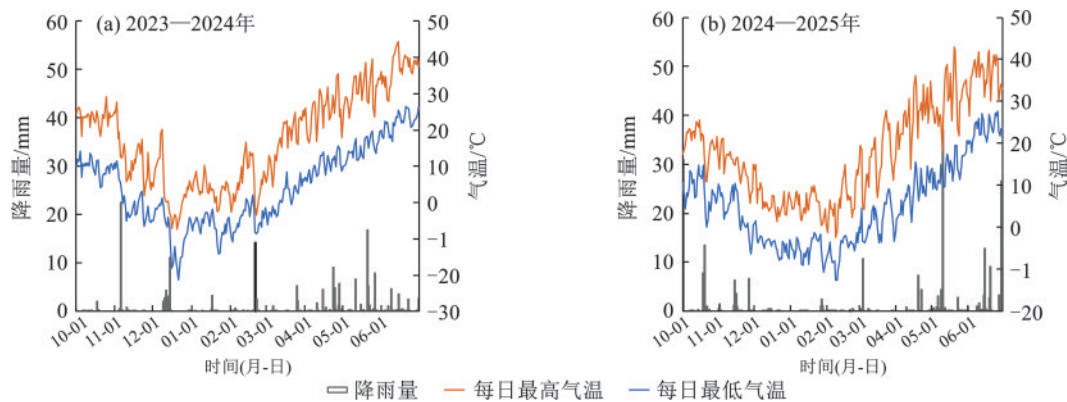


图 1 冬小麦生长季节期间的日最高温度、日最低温和降水量

Fig.1 Daily maximum temperature, daily minimum temperature, and precipitation during winter wheat growing seasons

表 1 2023—2025 年小麦全生育期降水量

Table 1 Precipitation throughout entire growth period of wheat (2023–2025)						mm
年份	播种期-越冬期	越冬期-返青期	返青期-拔节期	拔节期-开花期	开花期-成熟期	全生育期总计
2023—2024	48.43	22.55	9.05	30.20	47.66	157.89
2024—2025	43.80	6.64	12.88	12.24	53.29	128.85

表 2 0~20 cm 土壤基础地力

Table 2 Soil basic fertility in 0–20 cm layer						
年份	处理	pH	全氮/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
2023	W0N0	7.99ab	0.33b	16.52c	50.24a	262.35a
	W0N1	8.01ab	0.66a	18.71a	38.47a	193.66c
	W0N2	7.93cd	0.70a	18.40ab	40.87a	194.18c
	W1N0	8.02a	0.32b	16.18c	31.70e	179.82d
	W1N1	8.02a	0.70a	18.08ab	31.70e	179.82d
	W1N2	7.96bc	0.67a	17.34bc	27.95fg	163.54e
	W2N0	7.90cd	0.32b	16.33c	27.12g	161.03e
	W2N1	7.99ab	0.69a	18.08ab	34.04a	203.57b
2024	W2N2	7.89d	0.70a	18.63ab	29.24f	163.91e
	W0N0	8.13b	0.32b	16.10a	25.60d	248.23a
	W0N1	8.14b	0.70a	18.06a	36.64ab	227.65b
	W0N2	8.06b	0.71a	18.73a	28.77bcd	166.60de
	W1N0	8.14b	0.30b	15.76a	37.42ab	192.11c
	W1N1	8.30a	0.64a	18.24a	55.46a	126.99g
	W1N2	8.26a	0.67a	17.96a	26.81cd	155.09e
	W2N0	8.10b	0.30b	16.22a	38.65a	157.06e
	W2N1	8.05b	0.71a	18.25a	22.64d	141.32f
	W2N2	8.12b	0.70a	17.28a	37.14ab	176.19d

注:同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

1.3 数据收集

1.3.1 群体茎数 于小麦开始分蘖前选取距小区边缘1 m以上的样点“一米双行”作为调查对象,计数基本苗及拔节期、开花期和成熟期小麦的总茎(穗)数。成穗率等指标的计算公式为:

$$\text{成穗率} = \text{成熟期总穗数} / \text{最高总茎数} \times 100\%$$

$$\text{主茎穗比例} = \text{基本苗数} / \text{成熟期总穗数} \times 100\%$$

$$\text{分蘖穗比例} = (\text{成熟期总茎数} - \text{基本苗数}) / \text{成熟期总穗数} \times 100\%$$

$$\text{分蘖成穗率} = (\text{成熟期总茎数} - \text{基本苗数}) / (\text{最高总茎数} - \text{基本苗数}) \times 100\%$$

1.3.2 干物质积累和分配 于拔节期、开花期和成熟期,每小区取样30株,分解为叶片、叶鞘、茎秆、穗(开花期为穗,成熟期穗再分为颖壳和籽粒),称鲜重,105℃杀青30 min,于80℃烘至恒重并称量。计算公式为:

$$\text{开花前干物质转运量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{开花期干物质积累量} - \text{成熟期干物质积累量}(\text{籽粒除外})$$

$$\text{开花前干物质对籽粒的贡献率} = \text{开花前干物质转移量} / \text{成熟期籽粒干重} \times 100\%$$

$$\text{开花后干物质积累量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{成熟期籽粒干重} - \text{开花前干物质转移量}$$

$$\text{开花后干物质对籽粒的贡献率} = \text{开花后干物质积累量} / \text{成熟期籽粒干重} \times 100\%$$

1.3.3 产量及其构成因素 成熟期,定点调查各小区穗数;连续取20穗,计算穗粒数;各小区收获3 m²脱粒,晒干后称质量,计算千粒质量和产量。

1.3.4 幼苗生长指标 越冬期和返青期,每处理选取代表性小麦5株,用直尺测量株高、根长,计数次生根、分蘖数;其中3株用于称地上部与根鲜重,后105℃杀青,80℃烘至恒重,即为样品干重。

1.3.5 激素测定 越冬期,取地上部和根系鲜样0.5 g,3次重复,液氮速冻后将样品放在-80℃低温储藏。采用酶联免疫(ELISA)测定脱落酸(ABA)、吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA₃)含量。

1.3.6 SPAD测定 返青期、拔节期、开花期及灌浆期,采用SPAD叶绿素仪,测定田间小麦旗叶叶片叶绿素相对含量(SPAD);测定时间为上午9:30—11:30,每小区随机选取5株小麦,每株测定3次,最终取平均值。

1.3.7 氮素的分配和利用 成熟期,取样30株,将植株分成茎秆+叶鞘、叶片、穗轴+颖壳和籽粒4部分,烘干至恒重,利用间断式化学分析仪SmartChem600进行测定。氮素积累、利用等参数计算公式为:

$$\text{各器官氮素积累量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{器官氮素含量} \times$$

干物质质量

$$\text{氮素吸收效率}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{地上部氮素积累量} / \text{施氮量}$$

$$\text{氮素利用效率}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{籽粒产量} / \text{地上部氮素积累量}$$

$$\text{氮肥生产效率}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{籽粒产量} / \text{施氮量}$$

1.3.8 土壤养分含量 播种前,每小区按“S”形五点取样法取0~20 cm土壤样本,混合、风干、研磨过筛,参考鲍士旦^[26]的方法:采用钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量,火焰光度法测定土壤速效钾含量,K₂Cr₂O₇氧化法测定有机质含量,半微量凯氏定氮法测定全氮含量。

1.3.9 数据分析 采用Excel 2016和Origin 2024软件进行数据处理和图表绘制;用SPSS 26软件进行显著性检验(Duncan; $p=0.05$);用偏最小二乘路径模型(PLS-PM)绘制结构方程模型,测量具有良好的信度与聚合效度(Cronbach's $\alpha>0.7$, CR >0.8 , AVE >0.5)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对产量及构成要素的影响

由表3可知,产量及产量构成要素均随灌溉和施氮量增加而增加,其中W2N2产量最高,但与W2N1无显著差异。同灌溉水平下,两季产量W2N2、W2N1较W2N0分别显著增加109.85%、109.11%和141.78%、117.86%;W1N2、W1N1较W1N0分别显著增加101.85%、65.23%和107.68%、97.17%。两季穗数W2N2、W2N1较W2N0分别显著增加52.64%、48.34%和51.71%、47.38%;W1N2、W1N1较W1N0分别显著增加42.00%、38.00%和53.58%、52.00%。两季穗粒数W2N2、W2N1较W2N0分别显著增加37.04%、31.78%和38.19%、15.19%;W1N2、W1N1较W1N0分别显著增加33.22%、20.13%和21.48%、18.29%。第1季W2N2、W2N1千粒重较W2N0分别显著增加6.92%、5.98%;第2季无显著差异。

同施氮水平下,两季产量W2N2、W1N2较W0N2分别显著增加54.11%、45.53%和41.61%、25.27%;W2N1、W1N1较W0N1分别增加75.06%、35.80%和28.42% ($p<0.05$)、19.71%。两季穗数W2N2、W1N2较W0N2分别显著增加47.72%、25.54%和39.62%、21.38%;W2N1、W1N1较W0N1分别显著增加54.15%、30.94%和45.73%、29.06%。第1季穗粒数W2N2、W1N2较W0N2分别显著增加30.63%、27.81%;W2N1、W1N1较W0N1分别显著增加29.86%、19.15%;第2季穗粒数差异不显著。第1季千粒重W2N2较W0N2显著增加6.29%;

W2N1、W1N1 较 W0N1 分别显著增加 8.20%、6.21%;第 2 季各处理间无显著差异,可能与灌浆期遭遇极端降雨有关。方差分析显示,灌溉、施氮及二者互作对产量和穗数影响均显著。

表 3 2023—2024 年和 2024—2025 年小麦产量和产量构成因素
Table 3 Wheat yield and yield components in 2023–2024 and 2024–2025

年份	处理	穗数/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数/个	千粒重/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)
2023—2024	W0N0	481.11de	21.46e	38.61f	3 891.11g
	W0N1	482.22de	23.34d	39.61ef	4 953.34e
	W0N2	517.78c	24.13d	40.68de	5 646.67d
	W1N0	457.78e	23.15d	41.11cd	4 071.11f
	W1N1	631.44b	27.81c	42.07bc	6 726.67c
	W1N2	650.00b	30.84ab	40.46de	8 217.78b
	W2N0	501.11cd	23.00d	40.44de	4 146.66f
	W2N1	743.33a	30.31b	42.86ab	8 671.11a
	W2N2	764.88a	31.52a	43.24a	8 702.22a
2024—2025	W0N0	466.68d	23.79d	40.90ab	3 434.50d
	W0N1	493.32cd	28.94b	38.13bc	5 206.27c
	W0N2	530.00c	30.11ab	37.86c	5 240.25c
	W1N0	418.89e	24.39cd	41.42a	3 160.88d
	W1N1	636.67b	28.85b	40.57abc	6 232.54bc
	W1N2	643.33b	29.63ab	40.03abc	6 564.72ab
	W2N0	487.78cd	23.70d	42.42a	3 069.29d
	W2N1	718.89a	27.30bc	40.57abc	6 686.70ab
	W2N2	740.00a	32.75a	39.76abc	7 420.91a
2023—2024	W	341.04***	162.15***	39.38***	1 586.75***
	N	344.09***	217.48***	16.33***	3 796.78***
	W×N	70.88***	21.35***	7.83***	364.13***
2024—2025	W	91.01***	0.92	4.88*	8.26**
	N	151.47***	99.71***	6.09**	81.44***
	W×N	20.65***	1.73	0.39	4.00*

注:***表示 $p<0.001$;**表示 $p<0.01$;*表示 $p<0.05$ 。下同。

2.2 不同水氮处理对干物质积累的影响

由表 4 可知,随生育期的推进干物质积累量呈上升趋势,在成熟期达到最大值。同灌溉水平下,两季干物质积累量表现为,拔节期 W2N2 较 W2N1、W2N0 分别显著增加 7.02%、43.82% 和 42.75%、108.36%;开花期 W2N2 较 W2N1、W2N0 显著增加 5.39%、72.55% 和 5.64%、44.40%,W1N2 较 W1N1、W1N0 增加 17.29% ($p<0.05$)、73.65% ($p<0.05$) 和 4.37%、45.39% ($p<0.05$);成熟期 W2N2 较 W2N1、W2N0 显著增加 5.73%、102.75% 和 5.20%、51.95%,W1N2 较 W1N1、W1N0 显著增加 15.74%、84.25% 和

8.34%、60.58%。

同施氮水平下两季干物质积累量表现为,拔节期 W2N2 较 W1N2、W0N2 增加 3.55%、37.47% ($p<0.05$) 和 35.25% ($p<0.05$)、21.10% ($p<0.05$);开花期 W2N2 较 W1N2、W0N2 显著增加 4.05%、51.74% 和 0.35%、23.64%;成熟期 W2N2 较 W1N2、W0N2 增加 9.23% ($p<0.05$)、69.35% ($p<0.05$) 和 0.41%、27.46% ($p<0.05$),W2N1 较 W1N1、W0N1 增加 19.67% ($p<0.05$)、74.98% ($p<0.05$) 和 3.41%、40.97% ($p<0.05$)。方差分析显示,灌溉、施氮及二者互作对干物质积累影响均显著。

表 4 2023—2024 年和 2024—2025 年冬小麦各生育时期的干物质积累量

Table 4 Dry matter accumulation of winter wheat at each growth stage in 2023—2024 and 2024—2025

kg/hm ²				
年份	处理	拔节期	开花期	成熟期
2023—2024	W0N0	2 560.81d	5 858.33g	8 000.63h
	W0N1	2 705.52d	6 832.05e	10 182.40f
	W0N2	3 110.47c	7 403.08d	11 123.43e
	W1N0	2 601.92d	6 216.62fg	9 352.37g
	W1N1	4 029.71b	9 204.37c	14 888.18d
	W1N2	4 129.61ab	10 795.37b	17 232.13c
	W2N0	2 973.16c	6 510.15ef	9 290.70g
	W2N1	3 995.59b	10 659.08b	17 816.73b
2024—2025	W2N2	4 275.97a	11 233.20a	18 837.32a
	W0N0	2 592.25g	5 546.11e	7 813.45f
	W0N1	4 512.73e	6 419.25d	9 680.53d
	W0N2	5 617.92b	7 217.22c	11 263.30c
	W1N0	3 044.68f	6 117.08d	8 903.88e
	W1N1	5 160.29c	8 520.19ab	13 197.44b
	W1N2	5 030.36c	8 892.47b	14 297.73a
	W2N0	3 265.08f	6 179.80d	9 447.53d
2023—2024	W2N1	4 765.80d	8 447.23b	13 646.92b
	W2N2	6 803.36a	8 923.66a	14 355.88a
	W	181.04***	357.66***	992.46***
	N	240.32***	613.46***	1 572.10***
2024—2025	W×N	27.50***	59.27***	145.95***
	W	68.44***	119.43***	292.28***
	N	1 061.18***	267.74***	666.38***
	W×N	53.80***	10.96***	20.15***

2.3 不同水氮处理对干物质转运的影响

由表 5 可知,同灌溉水平,开花前干物质转运量随施氮量的增加而增加,但不同施氮量处理间的差异基本不显著;N0 的开花前干物质对籽粒的贡献率均高于 N1 和 N2 处理,仅第 1 季 W2N0 与 W2N1、W2N2 差异显著,分别高出 87.40%、162.18%。同施氮水平下,各处理开花前干物质转运量差异不显著;开花后干物质积累量随灌溉和施氮量增加呈增加趋势;两季开花前干物质对籽粒的贡献率随灌溉量增加呈下降趋势,表现为 W2N2、W1N2 较 W0N2 分别下降 63.42% ($p<0.05$)、36.52% 和 19.06%、13.93%

以及 W2N1、W1N1 较 W0N1 分别显著下降 52.12%、46.06% 和 35.08%、29.39%。开花前贮藏干物质对籽粒贡献率、开花后干物质积累量、开花后干物质对籽粒贡献率均受灌溉、施氮影响显著(除 2023—2024 年);水氮互作对开花后干物质积累量的影响显著。

2.4 不同水氮处理对小麦群体总茎(穗)数动态的影响

由表 6 可知,同灌溉水平下,两季总茎数随施氮量增加而增加,开花期表现为 W2N2、W2N1 较 W2N0 分别显著增加 51.38%、52.87% 和 52.36%、48.54%; W1N2、W1N1 较 W1N0 分别显著增加 38.21%、37.53% 和 45.77%、45.52%。第 1 季成穗率 W2N2、W2N1 较 W2N0 分别显著增加 15.5%、12.27%; W1N2、W1N1 较 W1N0 分别显著增加 9.04%、27.61%。第 2 季成穗率 W2N1 较 W2N2 增加 15.40%。第 1 季主茎穗比例 W2N2、W2N1 较 W2N0 分别显著下降 34.54%、32.63%。分蘖穗比例和分蘖穗成穗率随着施氮量的增加均显著增加,其中两季分蘖穗成穗率 W2N2、W2N1 较 W2N0 分别显著增加 100.05%、89.13% 和 50.84%、79.07%; W1N2、W1N1 较 W1N0 分别显著增加 113.06%、161.91% 和 83.09%、118.50%。

同施氮水平下,两季总茎数随灌溉次数增加而增加,拔节期表现为 W2N2 较 W1N2、W0N2 分别增加 7.50% ($p<0.05$)、9.62% ($p<0.05$) 和 3.72%、4.47%; W2N1 较 W1N1、W0N1 第 1 季分别显著增加 29.54%、49.75%。开花期, W2N2 较 W1N2、W0N2 分别显著增加 18.05%、48.85% 和 15.70%、38.65%; W2N1 较 W1N1、W0N1 分别显著增加 19.80%、64.01% 和 12.99%、45.92%。两季成穗率 W2N2 较 W1N2、W0N2 分别增加 9.44% ($p<0.05$)、34.70% ($p<0.05$) 和 8.51%、36.17% ($p<0.05$)。分蘖穗比例和分蘖穗成穗率随灌溉次数的增加而增加,其中两季分蘖穗比例 W2N2 较 W1N2、W0N2 分别显著增加 19.85%、81.19% 和 15.84%、69.23%; W2N1 较 W1N1、W0N1 分别增加 21.28%、116.24% 和 25.46%、57.75%。方差分析显示,灌溉、施氮及二者互作对拔节期至成熟期茎数、成穗率和成穗比例均有显著或极显著影响。

2.5 不同氮水平对幼苗激素含量及幼苗形态的影响

2.5.1 不同施氮处理对幼苗激素含量的影响 随着施氮量的增加,地上部 GA₃、IAA 含量均呈先升后降趋势,处理间表现为 N1_d>N2_d>N0(图 2)。其中, N1_d 的 GA₃ 含量较 N2_d、N0 分别显著增加 74.00%、275.01%, IAA 含量分别显著增加 9.45%、42.67%。ABA 含量表现为 N0>N2_d>N1_d, 其中, N2_d、N1_d 处理较 N0 分别显著降低 20.48% 和 35.59%。 IAA/ABA

的变化趋势与 GA₃、IAA 一致,各处理间表现为 N1_d>N2_d>N0,其中 N1_d 较 N2_d、N0 处理分别显著增加 34.89%、121.61%。表明 N1_d 处理更能促进小麦幼苗地上部生长。

表 5 2023—2024 年和 2024—2025 年冬小麦开花前的干物质转移量和开花后的干物质积累量以及对籽粒的贡献率
Table 5 Dry matter translocation amount before flowering, dry matter accumulation amount after flowering, and their contribution rates to grains of winter wheat in 2023–2024 and 2024–2025

年份	处理	开花前贮藏干物质		开花后干物质	
		转运量/(kg·hm ⁻²)	对籽粒贡献率/%	积累量/(kg·hm ⁻²)	对籽粒贡献率/%
2023—2024	W0N0	1 748.81ab	44.90a	2142.30f	55.10c
	W0N1	1 602.99ab	32.37ab	3 350.35de	67.63bc
	W0N2	1 926.32a	34.12ab	3 720.35d	65.88bc
	W1N0	935.36b	22.68bc	3 135.75de	77.32ab
	W1N1	1 042.85ab	15.50c	5 683.82c	84.50ab
	W1N2	1 781.01ab	21.66bc	6 436.77b	78.34ab
	W2N0	1 366.11ab	32.72ab	2 780.55ef	67.28bc
	W2N1	1 513.46ab	17.46c	7 157.65a	82.54a
	W2N2	1 098.10ab	12.48c	7 604.12a	87.52a
2024—2025	W0N0	1 120.33bc	33.00a	2 267.34f	67.00b
	W0N1	1 610.68a	33.07a	3 261.27d	66.93b
	W0N2	1 507.68a	27.13ab	4 046.08b	72.87b
	W1N0	1 014.39c	26.71b	2 786.79e	73.29a
	W1N1	1 425.68ab	23.35b	4 677.25b	76.65a
	W1N2	1 421.05ab	20.79b	5 405.26a	79.21a
	W2N0	985.74c	23.11b	3 267.72d	76.89a
	W2N1	1 423.63ab	21.47b	5 199.69a	78.52a
	W2N2	1 527.40a	21.96b	5 432.22a	78.04a
2023—2024	W	3.158**	13.981***	122.563***	13.981***
	N	0.780	6.266**	179.505***	6.266***
	W×N	1.594	1.171	17.233***	1.171**
2024—2025	W	1.21	17.58***	162.19***	17.58***
	N	18.19*	3.65*	367.05***	3.65*
	W×N	0.30	0.89*	8.74***	0.89*

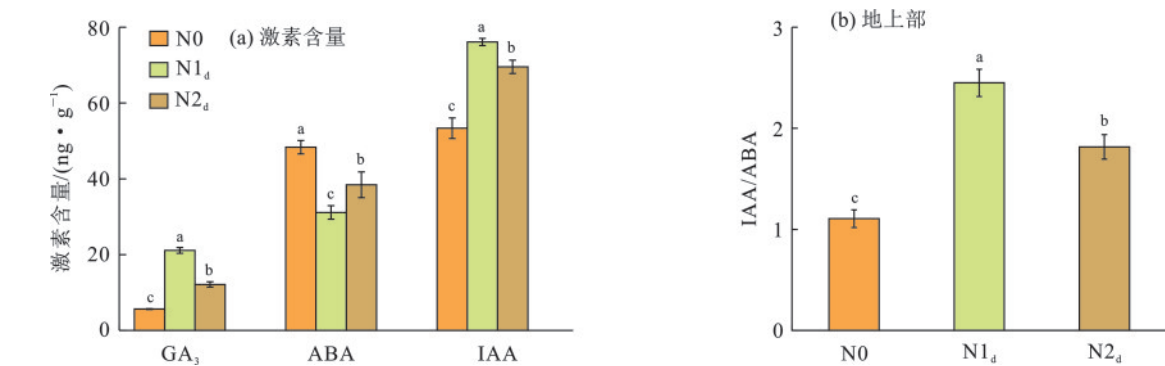
根系中 GA₃ 和 IAA 含量随施氮量增加均呈先升后降的变化趋势,处理间表现为 N1_d>N2_d>N0(图 3)。与 N0、N2_d 相比,N1_d 处理下 GA₃、IAA 含量分别显著增加 30.71%、27.92% 和 126.63%、55.31%。ABA 含量表现为 N0>N2_d>N1_d,其中 N1_d、N2_d 较 N0 处理分别显著降低 20.44%、19.69%。IAA/ABA 表现为 N1_d>N2_d>N0,N2_d、N0 较 N1_d 分别显著降低 36.18%、64.81%。表明 N1_d 处理更能促进小麦幼苗根系生长。

2.5.2 不同施氮处理对幼苗形态的影响 由表 7 可知,越冬期冬小麦根长表现为 N1_d>N2_d>N0,N1_d 较 N2_d、N0 分别提高 10.30% 和 46.52%(*p*<0.05);株高

在各处理间无显著差异;次生根数和根干重均在 N1_d 达最大值,较 N2_d、N0 分别增加 10%、120% 和 48.08%、170.25% (*p*<0.05);分蘖数在 N2_d 达最大值,较 N1_d 和 N0 分别增加 10% 和 120% (*p*<0.05)。返青期冬小麦根长表现为 N0>N2_d>N1_d,N0 较 N2_d、N1_d 分别显著增加 16.37% 和 23.04%;株高、次生根数、根干重和分蘖数均在 N1_d 达最大值,较 N2_d 分别显著增加 13.60%、32.26%、157.14% 和 10.34% (*p*>0.05),较 N0 分别显著增加 64.17%、78.26%、5.88% 和 113.33%。越冬期和返青期的幼苗形态在不同施氮处理下差异明显(图 4)。

表 6 2023—2025 年不同灌水次数和施氮量处理的小麦总茎(穗)数变化动态和成穗率
Table 6 Dynamics of total stem (spike) number and spike formation rate of wheat under different irrigation frequencies and nitrogen application rates (2023–2025)

年份	处理	起身期/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	拔节期/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	开花期/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	成熟期/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	成穗率/%	主茎穗 比例/%	分蘖穗 比例/%	分蘖穗 成穗 率/%
2023—2024	W0N0	—	903.33e	491.11d	481.11d	53.27bc	76.93b	23.07d	20.85c
	W0N1	—	904.45e	487.78d	482.22d	53.32bc	76.78b	23.22d	21.00c
	W0N2	—	1 235.56b	532.22c	517.78c	41.93f	71.51c	28.49c	17.10cd
	W1N0	—	968.89d	485.56d	457.78e	47.33e	80.87a	19.13e	14.78d
	W1N1	—	1 045.56c	667.78b	631.44b	60.40a	58.60d	41.40b	38.71a
	W1N2	—	1 260.00b	671.11b	650.00b	51.61cd	56.93d	43.07b	31.49b
	W2N0	—	1 025.56c	523.33c	501.11cd	48.90de	73.91bc	26.09cd	20.06c
	W2N1	—	1 354.45a	800.00a	743.33a	54.90bc	49.79e	50.21a	37.94a
	W2N2	—	1 354.44a	792.22a	764.88a	56.48b	48.38e	51.62a	40.13a
2024—2025	W0N0	1 410.00c	508.89e	475.00de	466.68d	33.11abc	67.54bc	32.46cd	13.91de
	W0N1	1 897.78b	941.11b	503.33cd	493.32cd	26.02de	63.95c	36.05c	11.26ef
	W0N2	2 231.11a	1 216.67a	543.33c	530.00c	23.89e	66.46bc	33.54cd	9.49f
	W1N0	1 316.67c	576.67d	446.67e	418.89e	31.98bc	77.70a	22.30e	9.46f
	W1N1	1 757.78b	1 000.00b	650.00b	636.67b	36.55ab	54.67d	45.33b	20.67ab
	W1N2	2 145.00a	1 225.56a	651.11b	643.33b	29.98cd	51.00d	49.00b	17.32cd
	W2N0	1 303.33c	785.56c	494.44d	487.78cd	37.45a	72.66ab	27.34de	14.24de
	W2N1	1 921.67b	993.33b	734.44a	718.89a	37.54a	43.13e	56.87a	25.50a
	W2N2	2 275.00a	1 271.11a	753.33a	740.00a	32.53bc	43.25e	56.76a	21.48b
2023—2024	W	—	220.18***	222.05***	341.04***	10.74***	194.54***	1974.54***	67.38***
	N	—	406.11***	184.16***	344.08***	29.75***	240.51***	240.51***	82.80***
	W×N	—	51.76***	41.71***	70.88***	24.06***	42.26***	42.26***	28.94***
2024—2025	W	1.96	30.08***	96.19***	91.01***	22.92***	25.25***	25.25***	37.29***
	N	112.32***	539.19***	52.94***	151.47***	11.30***	70.01***	69.98***	20.77***
	W×N	0.53	82.80***	71.10***	20.65***	3.95*	14.26***	14.26***	12.00***



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);N0、N1_d、N2_d处理分别为底施0、60、120 kg/hm²的纯氮处理。下同。

图 2 施氮处理对冬小麦地上部激素含量和 IAA/ABA 的影响
Fig. 2 Effects of nitrogen application treatments on hormone contents in aboveground parts of winter wheat and the ratio of IAA to ABA

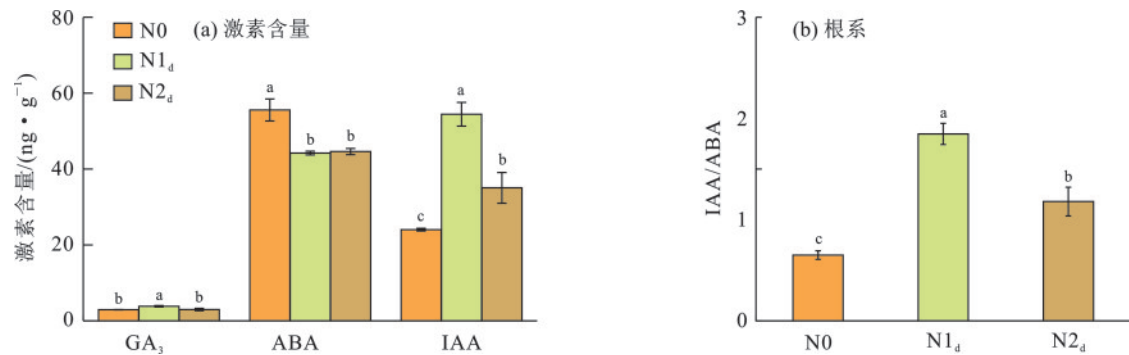


图3 施氮处理对冬小麦根系激素含量和 IAA/ABA 的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application treatments on hormone contents in winter wheat roots and the ratio of IAA to ABA

表 7 不同时期冬小麦幼苗形态差异

Table 7 Morphological differences in winter wheat seedlings at different growth stages

时期	处理	根长/ cm	株高/ cm	次生根数	根干 重/g	分蘖 数
越冬期	N0	8.04b	16.86a	2.00b	0.01b	1.00b
	N1 _d	11.78a	17.74a	4.40a	0.02a	2.00a
	N2 _d	10.68a	18.16a	4.00a	0.01ab	2.20a
返青期	N0	18.48a	16.58c	4.60c	0.17b	3.00b
	N1 _d	15.02b	27.22a	8.20a	0.18a	6.40a
	N2 _d	15.88b	23.96b	6.20b	0.07b	5.80a

进一步分析发现,地上部 GA₃ 含量、根系 GA₃ 和 IAA 含量均与根长、次生根数均呈显著正相关;地上部 ABA 含量与根长和次生根数、根系 ABA 含量与次生根数均呈显著负相关(图 5)。地上部 GA₃、IAA 含

量与 ABA 含量呈显著负相关,地下部 IAA/ABA 与地上部 GA₃、IAA 含量呈显著正相关,与 ABA 含量呈显著负相关。表明内源激素存在相互促进和制约的动态平衡关系,直接调控幼苗生长质量。

2.6 不同水氮处理对冬小麦 SPAD 的影响

由图 6 可知,随着冬小麦生育期的推进,SPAD 呈单峰曲线变化趋势,在开花期达到峰值。W2N2、W2N1 处理的 SPAD 均高于其他各处理,但二者之间并无显著差异。开花期 W2N2 处理的 SPAD 较 W2N1、W2N0 分别显著增加 2.17%、3.35%;W1N2 较 W1N1、W1N0 分别增加 1.92%、8.24% ($p<0.05$);W0N2 较 W0N1、W0N0 分别增加 0.04%、6.42% ($p<0.05$)。同施氮水平下,W2N2 较 W1N2、W0N2 分别显著增加 3.40%、3.84%;W2N1 较 W1N1、W0N1 分别显著增加 3.20%、8.81%;W2N0 较 W1N0、W0N0 分别增加 1.66%、6.92% ($p<0.05$)。

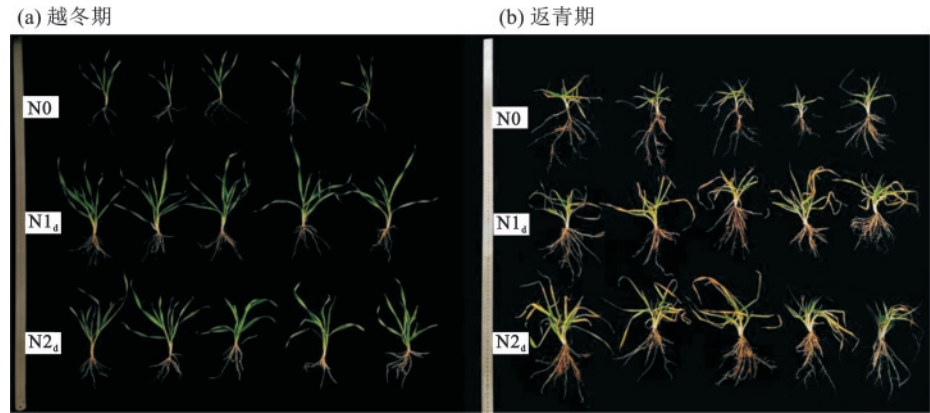


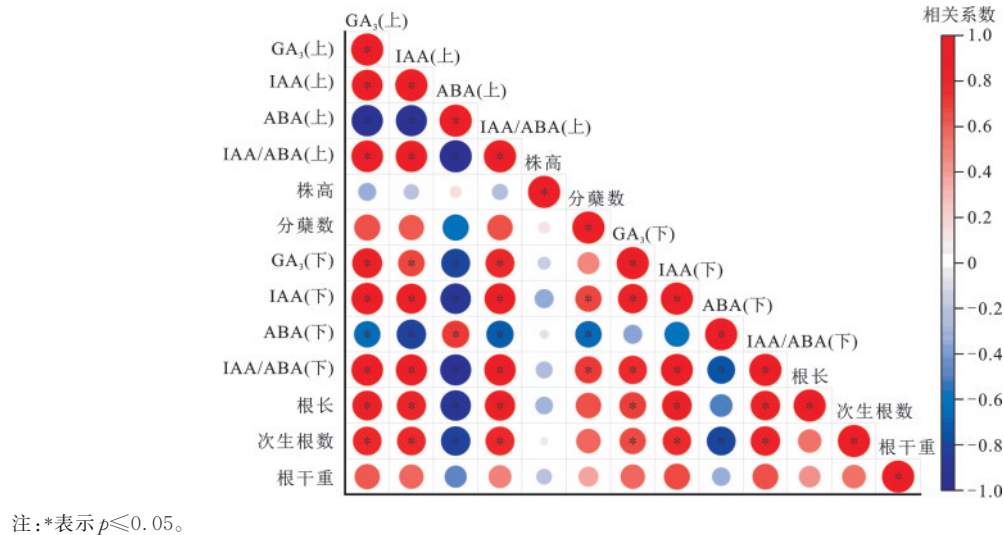
图 4 冬小麦越冬期和返青期幼苗形态

Fig.4 Seedling morphologies of winter wheat at overwintering stage and green-up stage

2.7 不同水氮处理对冬小麦氮素吸收和利用效率的影响

由表 8 可知,氮素积累量在 N2 处理下最大,较 N1、N0 处理分别显著提升 12%~37%、155%~173%。N1 处理下的氮素吸收效率和氮肥生产效率较 N2 显著提升 46%~78%、75%~90%,且二者均随灌溉量增加呈显著上升趋势,以 W2N1 处理达最高,

较 W2N2 处理显著提升 78%、90%;氮素利用效率随施氮量和灌溉量增加呈总体下降的趋势,以 W0N0 处理的值最高,且 W2N1 与 W2N2 无显著差异。表明灌溉可显著提升氮素吸收效率和氮肥生产效率,但过量施氮无法被小麦完全吸收利用,进而导致氮素吸收和利用效率降低。



注: *表示 $p \leq 0.05$ 。

图 5 冬小麦幼苗激素含量与形态指标的相关分析

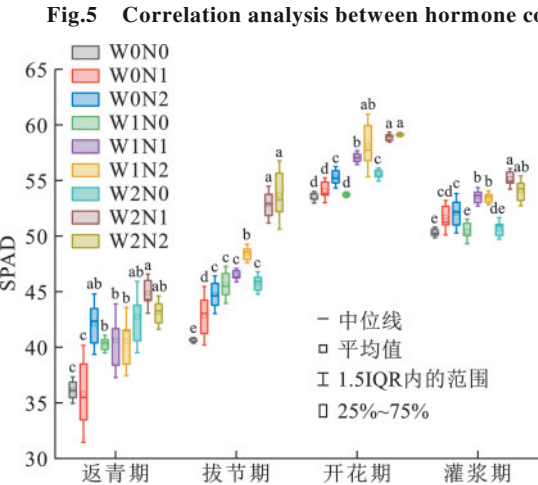


图 6 不同水氮处理对冬小麦 SPAD 的影响

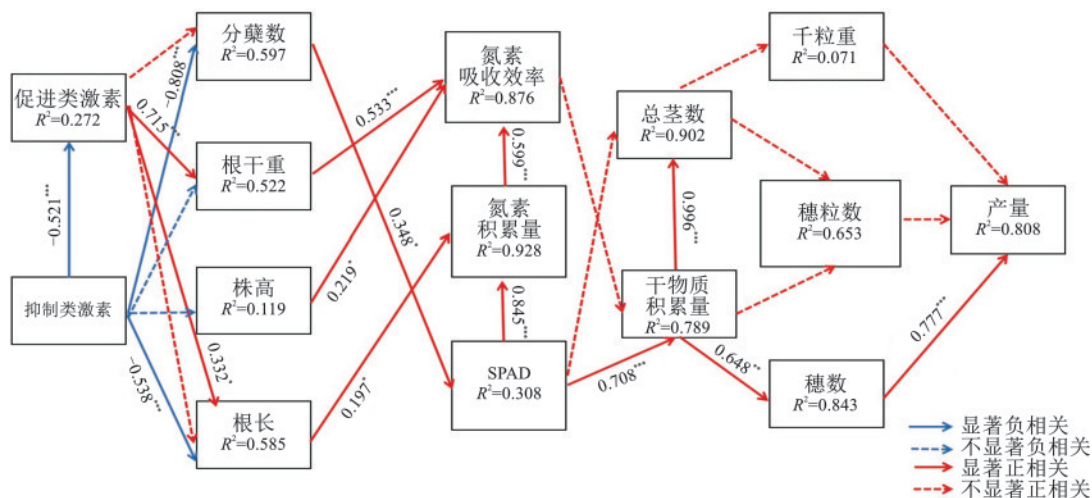
Fig.6 Effects of different water and nitrogen treatments on SPAD value of winter wheat

2.8 不同水氮处理下小麦产量指标的结构方程模型
偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析(图 7)表

明,内源激素对幼苗形态具有显著调控作用。抑制类激素与分蘖数(路径系数=-0.808)和根长(路径系数=-0.538)均呈显著负相关($p<0.001$);促进类激素与根干重(路径系数=0.715, $p<0.001$)、根长(路径系数=0.332, $p<0.05$)呈极显著和显著正相关。分蘖数与 SPAD 呈显著正相关(路径系数=0.348, $p<0.05$),根干重、株高与氮吸收效率呈正相关(路径系数=0.533, $p<0.001$;路径系数=0.219, $p<0.05$),根长与氮积累量呈显著相关(路径系数=0.197, $p<0.05$)。氮积累量与 SPAD、氮吸收效率呈极显著正相关(路径系数=0.845, $p<0.001$;路径系数=0.599, $p<0.001$),SPAD、群体总茎数均与干物质积累量也呈极显著正相关(路径系数=0.708, $p<0.001$;路径系数=0.996, $p<0.001$),而干物质积累量与穗数呈极显著正相关(路径系数=0.648, $p<0.01$),最终穗数直接影响产量(路径系数=0.777, $p<0.001$)。

表 8 不同水氮处理对小麦氮素积累与吸收利用效率的影响

Table 8 Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen accumulation and uptake efficiency of wheat				
处理	植株氮素积累量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮素吸收效率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮素利用效率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥生产效率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
W0N0	54.76g	NA	61.94a	NA
W0N1	108.68e	0.91d	44.88b	40.60c
W0N2	139.74d	0.58f	39.76d	23.14e
W1N0	72.04f	NA	52.93b	NA
W1N1	143.92d	1.19b	42.41cd	50.86b
W1N2	196.77c	0.82e	34.71e	28.44d
W2N0	100.35e	NA	42.41cd	NA
W2N1	227.67b	1.90a	29.12f	55.19a
W2N2	256.00a	1.07c	27.21f	28.99d
W	480.79***	497.77***	175.56***	314.39***
N	840.647***	693.77***	246.77***	4 010.94***
W×N	34.792***	68.23***	4.69**	52.88***



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图 7 冬小麦农艺性状及生理指标与产量关系的结构方程模型

Fig.7 Structural equation model of the relationships between agronomic traits, physiological indices and yield of winter wheat

3 讨论

3.1 水氮耦合对小麦产量的影响

作物达到高产的生长过程往往受多种因素制约,其中水分和氮素的影响最为突出^[27]。合理的灌溉与施氮量,能够显著增强水氮耦合效果,提升小麦产量^[28]。氮素供应充足,有助于增强作物吸水能力,充分发挥灌溉的增产作用。ZHU等^[29]研究显示,不施氮时灌溉量从0增至1 200 m³/hm²,小麦增产率为32.7%;而施氮量达240 kg/hm²时,增加灌溉量,增产率最高可提升43.8%。本试验中同样发现,水氮处理对小麦产量存在显著交互效应,且水氮长期定位下,W2N1与W2N2的产量无显著差异,与张经廷等^[30]研究结果一致,即施氮量达到120 kg/hm²后产量不再显著增加。表明120 kg/hm²施氮量可促进植株氮吸收达峰值,氮素吸收效率、氮素利用效率、氮肥生产效率等均处于较高水平,进一步增施氮肥则无明显增产效果。

小麦产量由穗数、穗粒数和千粒重共同决定。孟兆江等^[31]研究发现,充足的水分可显著促进拔节期小麦发育,推动营养器官发育与穗分化,减少不孕小花数量,进而提高穗粒数。本研究结果同样表明,各施氮水平下W1和W2处理的小麦穗粒数均显著高于W0。SHI等^[32]研究指出,籽粒产量形成关键在于花后的灌浆期,开花期灌溉可显著提升千粒重,与本研究结果一致,即W2处理的千粒重高于W1;但2024—2025年灌浆期遭遇极端暴雨大风天气,导致小麦灌浆进程受阻,高氮处理的千粒重下降。本研究中N1、N2处理的穗数和穗粒数均显著高于N0,但N1与N2间的穗数无显著差异,可能是由于N1处理的施氮量可以满足小麦前中期穗数形成需求。在W2下,N1和N2对小麦穗数、千粒重的调控效果相近,仅穗粒

数存在差异,但通过要素间协调,最终使产量无显著差异。

3.2 不同水氮处理对冬小麦群体特征的影响

合理的群体结构是小麦高产的条件基础,适宜穗数的形成需茎蘖稳定生长及合理的水氮措施作保障。小麦主茎成穗能力较为稳定,群体规模主要取决于分蘖的数量及成穗效率^[33]。丁锦峰等^[34]研究提出,适宜施氮量有利于促进分蘖发生,提高分蘖成穗率,进而增加穗数和产量。本研究中,N1、N2处理的成穗率、分蘖穗比例和分蘖成穗率均显著大于N0处理,与前人^[34]研究结果一致;而N1与N2间的分蘖穗成穗率与成穗率无显著差异,或N1显著大于N2,说明在长期定位试验条件下,N1处理下土壤中氮素含量可以满足小麦生长的需求,增强苗期小麦分蘖能力为后期成穗率提高奠定基础。同时,灌溉对小麦的群体茎数的影响更显著,其通过改善土壤含水量提高小麦分蘖能力^[35-37]。本试验中W1、W2处理的小麦分蘖能力、分蘖穗成穗率和分蘖穗比例均显著高于W0,说明灌溉能够提升小麦的分蘖能力。

干物质积累量是小麦产量形成的物质基础。适量施氮肥可利于干物质的积累与转运,但过量施氮会打破平衡,造成营养生长过盛,且抑制同化产物向籽粒的转运^[38]。本试验中,干物质积累量在N2处理下最高,与雷钧杰等^[39]研究结果一致,即240 kg/hm²的施氮量使小麦达到较高的干物质积累水平。同时,花后干物质积累量在W2和W1处理下均显著高于W0处理,与黄玲等^[40]研究结果一致,即水分胁迫促进开花前积累干物质向籽粒转运,但会显著抑制花后干物质的新增积累量,最终降低全生育期干物质总积累量。

3.3 不同氮素处理对冬小麦幼苗质量及生理特性的影响

高质量幼苗既能积累充足的养分保障安全越冬,又能在返青后快速恢复生长,增强抗逆性为产量形成奠定基础^[41-42]。姜苏育^[43]研究发现,低氮处理可通过调控根系激素信号与基因表达,促进小麦幼苗根系伸长,增加次生根数量与总吸收面积,提升养分吸收能力。与本研究结果一致,即适量施氮(N1_d)显著提高小麦次生根数量、根干重,促进根系发育扩大养分吸收范围,进而增强分蘖能力,利于形成壮苗。激素调控在小麦根系构建和整体生长发育中至关重要^[44]。各类激素相互制约、协同配合,通过调控细胞增殖与伸长,影响幼苗的株高、分蘖数及根系形态建成^[45]。张永强等^[46]研究表明,GA₃通过调控IAA的合成与分解,间接影响植株的生长;ABA则通过抑制细胞伸长分裂,减缓主根的生长速度降低植株的株高^[47]。本研究同样发现,地上部的IAA、GA₃含量以IAA/ABA的比值与小麦形态呈显著正相关。

适宜的施氮量可通过调控植株内源激素水平、缓解顶端优势对侧芽的抑制效应,促进分蘖萌发伸长与株高增长,协调幼苗生长发育与抗逆性,为培育壮苗提供生理基础^[48-49]。本研究发现,在长期定位试验条件下,N1_d处理显著增加小麦幼苗IAA和GA₃含量,通过促进细胞的增殖伸长,增加株高、分蘖数。而在N0条件下,ABA含量显著升高,导致植株生长受到限制,表现为株高增长缓慢、分蘖数减少等。说明N1_d处理能够增加促生长激素含量,降低抑制类激素含量,更利于后期植株的生长发育。低氮胁迫抑制植物光诱导气孔开放和叶绿素合成,降低光合效率与氮素积累量;过量施氮则导致氮肥利用率显著下降,造成氮素残留与浪费^[50-51]。本研究还发现,W2N2与W2N1处理下叶绿素含量无显著差异,氮素利用效率随施氮量和灌溉量的增加而下降,且W2N1处理的氮素吸收效率、氮肥生产效率显著高于W2N2,进一步说明合理调控施氮量是实现氮肥高效利用的关键。需注意的是,该研究聚焦水氮定位条件下小麦苗期的生理特性,尤其越冬期的内源激素含量测定未涉及当季灌水处理,因此水分调控对小麦内源激素的即时效应有待进一步探究。

4 结论

在长期水氮定位试验条件下,拔节期与开花期灌溉配施120 kg/hm²氮肥(N1),可保证高产的同时显著增加氮素吸收效率和氮素生产效率,主要是由于N1条件下穗数、千粒重、成穗率、总茎数未显著降

低,且苗期小麦促生长激素含量提升,增加株高、次生根数、根干重、分蘖数等形成壮苗,进而保证后期群体总茎数、干物质积累、成穗率、SPAD值及氮素吸收利用效率维持在适宜水平,最终稳定产量。

参考文献:

- [1] 杨毅轩,陈应枝,唐芑,等.播种方式对黄淮海麦区西部冬小麦氮素利用与产量形成的影响[J].应用生态学报,2023,34(6):1572-1582.
YANG Y X, CHEN Y Z, TANG P, et al. Effects of sowing patterns on nitrogen utilization and yield formation of winter wheat in the western Huang-Huai-Hai region[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6):1572-1582.
- [2] 吴芬,徐萍,郭海谦,等.冬小麦产量差和资源利用效率差及调控途径研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(10):1551-1567.
WU F, XU P, GUO H Q, et al. Advances in research regarding the yield gap and resource use efficiency of winter wheat cultivation and the related regulatory approaches[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10):1551-1567.
- [3] 张迪.基于DSSAT模型的冬小麦节水高产技术机理和优化管理策略研究[D].河北保定:河北农业大学,2018.
ZHANG D. Study on the mechanism of high-yield and water-saving technology for winter wheat and optimum agricultural managements using DSSAT model [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2018.
- [4] 吴英杰,董元杰,孙桂阳,等.水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对冬小麦生长和氮素利用率的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):285-294.
WU Y J, DONG Y J, SUN G Y, et al. Effects of integrated water and fertilizer nitrogen application combined with nitrogen fertilizer synergist on winter wheat growth and nitrogen use efficiency[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):285-294.
- [5] 秦京涛,吕谋超,李浩,等.生物炭用量、灌水量和施氮量对华北地区滴灌冬小麦产量及水氮利用的影响[J].灌溉排水学报,2025,44(4):15-23.
QIN J T, LYU M C, LI H, et al. Impact of biochar, irrigation and nitrogen fertilization on yield and resource use efficiency of drip-irrigated winter wheat in northern China [J].Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(4):15-23.
- [6] 崔振坤,于振文,石玉,等.水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用的影响[J].水土保持学报,2025,39(1):160-169.
CUI Z K, YU Z W, SHI Y, et al. Effects of water and nitrogen management on soil nitrogen metabolism enzyme activity and wheat nitrogen utilization[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):160-169.
- [7] 吉艳芝,冯万忠,郝晓然,等.不同施肥模式对华北平原小麦-玉米轮作体系产量及土壤硝态氮的影响[J].生态环境学报,2014,23(11):1725-1731.

- JI Y Z, FENG W Z, HAO X R, et al. Effects of different fertilization pattern on the yield of the rotation system of wheat and maize and soil nitrate accumulation in north China Plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11):1725-1731.
- [8] 欧阳西荣. 小麦冬前壮苗的增产机理与高产栽培技术 [J]. *湖南农学院学报*, 1995, 21(3):239-244.
- OUYANG X R. The mechanism of wheat yield increased by pre-winter vigorous seedlings and higher yield techniques [J]. *Journal of Hunan Agricultural College*, 1995, 21(3):239-244.
- [9] 王峻, 宋科, 潘剑君, 等. 氮磷养分胁迫下小麦幼苗期生物学响应研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2):152-158.
- WANG J, SONG K, PAN J J, et al. Study of biologic response of wheat seedling to low nitrogen and phosphorus stress [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2):152-158.
- [10] 沈学善, 屈会娟, 李金才, 等. 小麦玉米秸秆全量还田对冬小麦出苗和光合生产的影响 [J]. *西南农业学报*, 2012, 25(3):847-851.
- SHEN X S, QU H J, LI J C, et al. Effects of wheat and maize straw returned to field on emergence and production of photosynthesis of winter wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(3):847-851.
- [11] 张震茜, 杭雅文, 李福建, 等. 稻秸还田年数和氮肥运筹对小麦出苗和幼苗形态及生理特性的影响 [J]. *核农学报*, 2020, 34(8):1805-1813.
- ZHANG C X, HANG Y W, LI F J, et al. Effects of rice straw returning and nitrogen fertilizer on seedling emergence and morphological and physiological characteristics of wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(8):1805-1813.
- [12] 杨丹丹, 韩雪, 孔欣欣, 等. 71份冬小麦苗期渗透胁迫抗性鉴定及相关农艺性状指标分析 [J]. *作物杂志*, 2025(1):243-249.
- YANG D D, HAN X, KONG X X, et al. Identification of osmotic stress resistance and analysis of related agronomic traits of 71 winter wheat seedlings [J]. *Crops*, 2025(1):243-249.
- [13] 叶君, 邓西平, 王仕稳, 等. 干旱胁迫下褪黑素对小麦幼苗生长、光合和抗氧化特性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(9):1275-1283.
- YE J, DENG X P, WANG S W, et al. Effects of melatonin on growth, photosynthetic characteristics and antioxidant system in seedling of wheat under drought stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(9):1275-1283.
- [14] 徐澜, 高志强, 安伟, 等. 冬麦春播小麦发育进程中主茎叶片内源激素的变化 [J]. *核农学报*, 2016, 30(2):355-363.
- XU L, GAO Z Q, AN W, et al. Responses of endogenous hormone contents in leaves of main stem in different developmental stages of winter wheat varieties sowed in spring [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(2):355-363.
- [15] VANNESTE S, PEI Y R, FRIML J. Mechanisms of auxin action in plant growth and development [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2025, 26(9):648-666.
- [16] 孟令浩. 生长素和赤霉素浸种缓解棉花幼苗干旱胁迫的效应 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- MENG L H. Effect of seed soaking with auxin and gibberellin on drought stress alleviating of cotton seedlings [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [17] 杨英. 分蘖肥对不同苗质南粳9108分蘖发生、根系生长及氮素吸收利用的影响 [D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2023.
- YANG Y. Effects of tillering fertilizer on tillering, root growth and nutrient absorption and utilization of Nanjing 9108 with different seedling qualities [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2023.
- [18] 王昌秀, 吴复学, 石玉, 等. 测墒补灌条件下施氮量对小麦叶绿素荧光特性及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(8):1072-1077.
- WANG C X, WU F X, SHI Y, et al. Effect of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in wheat under supplemental irrigation based on measuring soil moisture [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(8):1072-1077.
- [19] 宋晓, 关涵文, 徐新朋, 等. 不同氮效率小麦成熟期茎叶干物质积累量与氮素利用率的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(10):1915-1931.
- SONG X, GUAN H W, XU X P, et al. Relationship between stem and leaf dry matter accumulation and the nitrogen utilization at maturity of wheat cultivars with different nitrogen efficiencies [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(10):1915-1931.
- [20] 傅高明, 李纯忠. 土壤肥料的长期定位试验 [J]. *世界农业*, 1989(12):22-25.
- FU G M, LI C Z. Long-term location test of soil fertilizer [J]. *World Agriculture*, 1989(12):22-25.
- [21] SUN Y, AMELUNG W, WU B, et al. Fertilizer P-derived uranium continues to accumulate at Rothamsted long-term experiments [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820:e153118.
- [22] LING N, ZHU C, XUE C, et al. Insight into how organic amendments can shape the soil microbiome in long-term field experiments as revealed by network analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99:137-149.
- [23] 丁世杰, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期施肥下土壤氮素指标与小麦/玉米产量关系研究 [J]. *核农学报*, 2025, 39(1):157-169.
- DING S J, HUANG S M, ZHANG S Q, et al. Study on the relationship between soil nitrogen indexes and wheat/maize yield under long-term fertilization [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(1):157-169.
- [24] 董志强, 吕丽华, 张丽华, 等. 长期水氮互作下不同年代冬小麦的产量和光合特性 [J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(12):1524-1532.
- DONG Z Q, LÜ L H, ZHANG L H, et al. Yield and photosynthetic characteristics of winter wheat released in different ages under long-term water-nitrogen interaction [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(12):1524-1532.

- [25] 李浩然.长期水氮措施调控冬小麦产量形成和土壤肥力的机制研究[D].河北保定:河北农业大学,2023.
LI H R. Study on the mechanism of long-term water and nitrogen measures regulating winter wheat yield formation and soil fertility[D].Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2023.
- [26] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed.Beijing: China Agriculture Press,2000.
- [27] WANG L L, PALTA J A, CHEN W, et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling[J].Agricultural Water Management,2018,197:41-53.
- [28] 柳腾飞,马莉,汪顺生,等.不同灌溉方式下水氮供应对冬小麦水氮利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2024,43(7):11-18.
LIU T F, MA L, WANG S S, et al. Effects of water-nitrogen coupling under different irrigation methods on water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J].Journal of Irrigation and Drainage,2024,43(7):11-18.
- [29] ZHU A N, ZHANG J B, ZHAO B Z, et al. Water balance and nitrate leaching losses under intensive crop production with Ochric Aquic Cambosols in north China plain [J].Environment International,2005,31(6):904-912.
- [30] 张经廷,陈青云,吕丽华,等.冬小麦-夏玉米轮作产量与氮素利用最佳水氮配置[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):886-896.
ZHANG J T, CHEN Q Y, LÜ L H, et al. Optimum combination of irrigation and nitrogen for high yield and nitrogen use efficiency in winter wheat and summer maize rotation system[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2016,22(4):886-896.
- [31] 孟兆江,段爱旺,高阳,等.调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):203-212.
MENG Z J, DUAN A W, GAO Y, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):203-212.
- [32] SHI Y, YU Z W, MAN J G, et al. Tillage practices affect dry matter accumulation and grain yield in winter wheat in the north China plain [J]. Soil and Tillage Research,2016,160:73-81.
- [33] 石玉华,初金鹏,尹立俊,等.宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J].农业工程学报,2018,34(17):127-133.
SHI Y H, CHU J P, YIN L J, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(17):127-133.
- [34] 丁锦峰,乐韬,李福建,等.耕作方式和施氮量对稻茬小麦产量构成和群体质量的影响[J].中国农学通报,2019,35(5):93-99.
DING J F, LE T, LI F J, et al. Tillage modes and nitrogen fertilization rates affect yield component and population quality in wheat following rice[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(5):93-99.
- [35] 邵敏敏,赵凯,徐兴科,等.不同灌溉施肥方式对小麦群体及产量的影响[J].安徽农业科学,2019,47(10):35-37.
SHAO M M, ZHAO K, XU X K, et al. Effects of irrigation and fertilization on population structure and yield of wheat [J].Journal of Anhui Agricultural Sciences,2019,47(10):35-37.
- [36] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.灌溉模式对不同密度小麦群体质量和产量的影响[J].麦类作物学报,2011,31(6):1116-1122.
LIU L P, OUYANG Z, WU L F, et al. Effect of irrigation schedules on population quality and grain yield of winter wheat under different densities[J].Journal of Triticeae Crops,2011,31(6):1116-1122.
- [37] 冯连杰,于振文,张永丽,等.灌溉对小麦分蘖发生和不同茎蘖光合同化物生产分配及成穗的影响[J].作物学报,2023,49(6):1653-1667.
FENG L J, YU Z W, ZHANG Y L, et al. Effects of irrigation on tiller occurrence, photo-assimilates production and distribution in different stem and tillers and spike formation in wheat[J].Acta Agronomica Sinica,2023,49(6):1653-1667.
- [38] 赵财,王巧梅,郭瑶,等.水氮耦合对地膜玉米免耕轮作小麦干物质积累及产量的影响[J].作物学报,2018,44(11):1694-1703.
ZHAO C, WANG Q M, GUO Y, et al. Effects of water-nitrogen coupling patterns on dry matter accumulation and yield of wheat under no-tillage with previous plastic mulched maize[J].Acta Agronomica Sinica,2018,44(11):1694-1703.
- [39] 雷钧杰,张永强,赛力汗·赛,等.施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J].麦类作物学报,2017,37(8):1078-1086.
LEI J J, ZHANG Y Q, SAILIHAN L S, et al. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, distribution and translocation of winter wheat under drip irrigation [J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(8):1078-1086.
- [40] 黄玲,高阳,李新强,等.水分胁迫下不同年代冬小麦品种干物质积累与转运特性[J].中国生态农业学报,2013,21(8):943-950.
HUANG L, GAO Y, LI X Q, et al. Effects of water stress on dry matter accumulation and translocation in winter wheat cultivars planted at different ages [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8):943-950.
- [41] 蔡洪梅,王菲菲,王捧娜,等.冬小麦越冬期壮苗评价方法与指标研究进展[J].应用生态学报,2024,35(2):555-563.
CAI H M, WANG F F, WANG P N, et al. Research progress on the method and index evaluating strong seedlings of winter wheat during overwintering stage [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2):555-563.
- [42] 陈翔,张乐乐,吴宇,等.秸秆还田对小麦出苗质量的影响及对策[J].安徽农学通报,2021,27(2):27-29.

- CHEN X, ZHANG L L, WU Y, et al. Effect of straw returning to field on the quality of wheat seedling emergence and its countermeasures[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(2): 27-29.
- [43] 姜苏育. 低氮营养对小麦幼苗根系生长与氮素吸收利用的影响及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- JIANG S Y. Effects of n-deficiency supply on root growth and nitrogen uptake in wheat seedlings and its physiological mechanism[D]. Nanjing: Agricultural University, 2018.
- [44] 龚璞, 李宗震, 岳慧芳, 等. 不同小麦抗旱品种种子萌发的根系特征及其与主要激素含量的关系[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(1): 16-21.
- GONG P, LI Z Z, YUE H F, et al. Study on the relationship between root system characters and the content of main hormones in germination of drought-resistant winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(1): 16-21.
- [45] 蔡铁, 徐海成, 尹燕桦, 等. 外源 IAA、GA₃ 和 ABA 影响不同穗型小麦分蘖发生的机制[J]. *作物学报*, 2013, 39(10): 1835-1842.
- CAI T, XU H C, YIN Y P, et al. Mechanisms of tiller occurrence affected by exogenous IAA, GA₃, and ABA in wheat with different spike-types [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(10): 1835-1842.
- [46] 张永强, 雷钧杰, 陈传信, 等. 遮阴程度对小麦旗叶内源激素含量、抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(10): 1334-1341.
- ZHANG Y Q, LEI J J, CHEN C X, et al. Effects of shading degree on endogenous hormone content, antioxidant enzyme activity and photosynthetic characteristics of wheat flag leaves[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(10): 1334-1341.
- [47] WANG B X, ZHOU L, LI L Q, et al. The transcription factor TaFDL2-1A functions in auxin metabolism mediated by abscisic acid to regulate shoot growth in wheat [J]. *Plant Physiology*, 2024, 197(1): e569.
- [48] WANG R F, ZHANG J W, LU P, et al. Effects of endogenous hormones on tiller development process of different maize varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5): 840-847.
- [49] 王荣荣, 谢冰莹, 王海琪, 等. 滴灌春小麦根系形态特征及内源激素含量对花期干旱及复水的响应[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(9): 1174-1186.
- WANG R R, XIE B Y, WANG H Q, et al. Response of root morphology and endogenous hormones of drip irrigated spring wheat to drought stress and rewatering at anthesis stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(9): 1174-1186.
- [50] WANG L Y, CHEN S Y, SHI W, et al. Nitrate starvation inhibits stomatal opening *via* the long-distance CEP1-CEPR2 signaling cascade [J]. *Cell Reports*, 2025, 44(10): e116424.
- [51] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 466-472.
- ZHAO J Y, YU Z W, LI Y Q, et al. Effects of nitrogen application rate on soil inorganic nitrogen distribution, microbial biomass nitrogen content and yield of wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 466-472.
- 上接第 322 页
- [23] 高福奎. 滴水春灌对南疆覆膜棉田水热盐分布及棉花生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- GAO F K. Effects of drip spring irrigation on water-heat-salt distribution and cotton growth in mulched cotton fields in southern Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.
- [24] 李彦. 北疆滴灌棉田墒情监测点优化布设及灌水下限指标研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- LI Y. Research on optimized layout of the monitoring points and irrigation threshold index in drip irrigation cotton field in north Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [25] 申孝军, 张寄阳, 孙景生, 等. 灌水模式及下限对滴灌棉花产量和品质的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(8): 711-718.
- SHEN X J, ZHANG J Y, SUN J S, et al. Effect of drip irrigation pattern and irrigation lower limit on yield and quality of cotton [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(8): 711-718.
- [26] 齐文婷, 王航, 薛皓文, 等. 灌水下限对北疆棉花光合生理和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2024(12): 95-101.
- QI W T, WANG H, XUE H W, et al. Effect of irrigation lower limit on photosynthetic physiology and yield of cotton in northern Xinjiang [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(12): 95-101.
- [27] HE P R, LI J G, YU S E, et al. Soil moisture regulation under mulched drip irrigation influences the soil salt distribution and growth of cotton in southern Xinjiang, China [J]. *Plants*, 2023, 12(4): e791.
- [28] CHEN X P, QI Z M, GUI D W, et al. Simulating impacts of climate change on cotton yield and water requirement using RZWQM2 [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 222: 231-241.
- [29] WANG H B, YIN Z, ZHANG L, et al. Irrigation modulates the effect of increasing temperatures under climate change on cotton production of drip irrigation under plastic film mulching in southern Xinjiang [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: e1069190.
- [30] LI Y F, FENG Q Q, LI D W, et al. Water-salt thresholds of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under film drip irrigation in arid saline-alkali area [J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): e1769.